

発明の名称 (TITLE OF THE INVENTION)

光モジュール (Optical module)

CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

The present application claims the benefit of the dates of the earlier filed provisional application, having U.S. Provisional Application Number 60/413,535 filed on September 24, 2002, all of which are incorporated herein their entirety.

発明の背景 (BACKGROUND OF THE INVENTION)

発明の分野 (Field of invention)

本発明は、周波数多重(Frequency Division Multiplexing : FDM)した光信号を伝送する光通信システムにおいて用いる光増幅、及び、その増幅時のゲインスロープの平坦化に関する。

従来技術 (Related art)

ディジタル又はアナログ信号を周波数多重 (FDM) した光信号を伝送し、スターカプラで分配して、複数の加入者に多チャネルの映像信号を分配する映像分配システムが、現在、実用化されている。このシステムにおいては、分配伝送時にパワーの損失が発生するため、この光分岐損失を補償する必要があるが、この補償のために、広くエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (Erbium Doped Fiber Amplifier : EDFA) が適用されている。なお、加入者向け映像分配システムへのエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) の適用に関しては、E. Yoneda, et al., IEEE/JLT, vol. 11, no. 1, pp. 128-137, 1993 に、詳細が記載されている。

一般的に、光信号を発生させる方法としては、信号光源となる半導体レーザなどに対し、変調された電気信号を直接重畳する直接変調と、一定の光出力で光源から出射している信号光の強度を、外部変調器に電気信号を印加することによって制御する外部変調のふたつの方法が知られている。

直接変調方式は、比較的安価にシステムを構成できる。しかし、半導体レーザ自身に変調をかけることによって、わずかではあるが、発信波長が不安定になる一般にチャープと呼ばれる問題が発生する。

一方、外部変調方式はチャープ特性に優れている。しかし、その反面、

レーザ光源の外に外部変調器を設置する必要があるため、コスト面での問題がある。こういった観点から、コスト的にメリットのある直接変調方式を、信号光源として使用する事がある。加入者向けCATVシステムなどにおいては、直接変調方式が多く用いられている。

このような光通信システムにおいて、信号光源に使用する光源の仕様や製造上の問題により、中心波長±10nm程度の幅が発生する。実際には中心波長±5nmの範囲程度の光源が用意可能であるが、バラツキもあるため、上記の仕様値である±10nm程度まで中心波長がずれる場合がある。

こうした場合に、伝送装置であるエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)は、波長に対して許容範囲が広い方がシステム側としては都合がよい。また、コスト面からも、エルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)の波長範囲が広い方が、半導体レーザの波長選別の必要がなくなるため有利である。更に、周波数多重(FDM)した信号を、更に波長多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)して伝送する方式も考案されており、この場合においても使用波長帯域が広い事が望まれる。

しかし、直接変調方式の信号光源を使用する場合、信号光のチャープが大きいために、エルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)の利得波長依存性(ゲインスロープ)との相互作用により、信号歪が発生しやすく、そのために適用可能な信号光波長帯域が制限されるという問題が発生した。この点は、K. Kikushima, IEEE/PTL, vol.3, no.10, pp.945-947, 1991に開示されている。

この信号歪は、2次歪(Composite second-order distortion: CSO)によって表わすことができる。この2次歪(CSO)とエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)のゲインスロープ、および信号光のチャープの間の関係は、下記の式(1)で表すことができる。

2次歪の同一チャネルの結合波の数をK、エルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)の利得をG、信号光波長を λ 、光源の信号波長を λ_0 、1チャネルあたりのチャープ波長幅を λ_{chirp} と仮定すると、式(1)で表され、これよりゲインスロープ $dG/d\lambda$ が小さい程、信号歪が少ないことが判る。

$$CSO = 20 \log \left\{ K \cdot \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{d\lambda} \right\}_{\lambda=\lambda_0} \cdot \lambda_{chirp} \quad [\text{dB}] \quad \text{式 (1)}$$

通常アナログシステムにおいて許容できる歪量を、ゲインスロープに換算した場合には、信号光源のチャープ量にも依存するが、伝送路内に存在する全ての増幅器のゲインスロープの合計が、およそ $\pm 0.6\text{dB/nm}$ 以下（絶対値で 0.6dB/nm 以下）であることが必要である。

従って、例えば、2 段の増幅器を接続した場合には、1 台の増幅器に許容されるゲインスロープ量はおよそ $\pm 0.3\text{dB/nm}$ 以下（絶対値で 0.3dB/nm 以下）である。

このように、信号歪を抑制する為には、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）のゲインスロープを抑制する必要があるが、その抑制方法の一つとして、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）の増幅媒体に、アルミニウム（Al）を高濃度に添加されたエルビウムドープ光ファイバ（EDF）を適用する方法がある。これは、エルビウムドープ光ファイバ（EDF）は、アルミニウム（Al）を高濃度で添加すると増幅特性の波長依存性（ゲインスロープ）が少なくなる性質が知られているが、この性質を利用したものである。

図 9 に従来の機器構成を用いたゲインスロープの特性の一例として、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）のゲインスロープを小さく抑える為に、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）にアルミニウム（Al）を高濃度に添加したエルビウムドープ光ファイバ（EDF）を適用した場合のゲインスロープの波長特性を示す。

本図は、アナログアンプに入力する 1ch の FDM 信号（WDM 信号ではない）の入力信号波長、及び入力信号光パワーをそれぞれ変化させた場合のエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）のゲインスロープを評価した結果である。グラフの縦軸はゲインスロープ（ dB/nm ）であり、横軸は波長（ nm ）である。

ここで注意しなければならないのは、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）の利得特性は波長依存性を持ち、且つ、この波長依存性は常に一定ではなく、増幅器に入力される入力信号光パワーによっても変化することである。

このため、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）がアナログ光伝送システムでの動作を保証できる範囲は、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）への入力信号光パワー及び入力波長条件によって変化

する増幅特性のうち、ゲインスロープがシステム上許容される値以内である範囲内に限られる。

実際には、エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) の増幅動作の可能な入力信号光パワーと入力波長によって得られる条件の範囲内において、アナログ信号の増幅動作による信号歪が発生しない動作領域であるゲインスロープ量が 0.3dB/nm 以下となる範囲が選択される。

このシステムにおいて 10dB の入力ダイナミックレンジを考えた場合、図 9 に示されているように、ゲインスロープがおおよそ $+0.4\text{dB/nm}$ ～ -0.9dB/nm まで変化する。しかし、上述のように、アナログ伝送システムに本アンプを適用する際、この全ての入力領域では使えない。2 段増幅のシステムのモデルを考えると、絶対値で 0.3dB/nm の領域が適用可能範囲であるから、本アンプでは、 $1554\sim 1559\text{nm}$ のせいぜい 5nm の範囲しか使えない事になる。

従って、アルミニウム (Al) を高濃度に添加されたエルビウムドープ光ファイバ (EDF) を適用したとしても、ある特定の入力信号光パワー又は入力波長条件では、ゲインスロープを極小にする事は可能である。しかし、全ての入力信号光パワー及び入力波長条件において、ゲインスロープを実用可能なレベルに低く抑制することは、原理的に不可能である。

一方、ゲインの波長依存性 (ゲインプロファイル) を少なくするといった目的では、良く似た光学フィルタに WDM アンプの利得平坦性を実現する事を目的とした利得等化フィルタ (Gain Flattening Filter : GFF) がある。これは、波長多重 (WDM) 信号の各波長の利得が均一となるように透過率の波長プロファイルを設計したもので、ファイバブレイティング (Fiber Brag Grating: FBG) や誘電体多層膜フィルタなどが使用される。利得等化フィルタ (GFF) の場合には、要求されるプロファイルは、大方、波長多重利得特性の逆特性 (単位: dB) であり、システム側より要求された平坦性のみ満足していればよく、多少損失特性の振幅にリプルがあっても許容される。このため、リプルによって生じる急峻なゲインスロープや、ゲインスロープに対し過剰な負の傾きを有する場合は、寧ろ歪を余計発生させる結果となるため、このフィルタは本用途には適していない。

発明の要約 (SUMMARY OF THE INVENTION)

従って、本発明の目的は、上述した光増幅器を適用した光通信システムにおける従来の問題を解決して、ゲインスロープを抑制して幅広い波長帯域で通信を可能にすることにある。

本発明者は、上述した問題を解決すべく、鋭意研究を重ねた。その結果、以下に示すように、光増幅器を適用した光通信システムにおいて、従来技術では困難であった、ゲインスロープを抑制して、実用可能な波長帯域を大幅に広げることが可能な光モジュールを知見した。

本発明では、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）に代表される光増幅器とゲインスロープ補償光フィルタ（Gain Slope Compensation Filter : GSCF）を組み合わせた光モジュールによって、入力信号光のパワー及び入力波長の条件にかかわらず、従来に比べて、大幅にゲインスロープを抑制することが可能となった。これによって、増幅器の動作領域（適用領域）が拡張され、通信システムとして利用できる実用波長帯域を拡張することが可能である。

更に、本発明の光モジュールは、光信号の分配システムのみならず、光出力システム、光入力システム等への応用も可能であり、様々な種類の光通信システムに適用可能な光モジュールである。

本発明の光モジュールの第1の実施態様は、入側の光ファイバと、前記入側の光ファイバに光学的に接続された光フィルタと、前記光フィルタに光学的に接続された出側の光ファイバと、が備えられた光モジュールであって、前記光フィルタが前記入側の光ファイバ又は前記出側の光ファイバに接続された光増幅器の利得（ゲイン）のゲインスロープ（ $dG/d\lambda$ ）（ここで、 G は利得、 λ は波長を表す。）を平坦化するゲインスロープ補償フィルタであることを特徴とする光モジュールである。

本発明の光モジュールの他の実施態様は、前記ゲインスロープ補償光フィルタが、誘電体多層膜フィルタであることを特徴とする光モジュールである。

本発明の光モジュールの他の実施態様は、前記ゲインスロープ補償光フィルタが、長周期ファイバグレーティングであることを特徴とする光モジュールである。

本発明の光モジュールの他の実施態様は、前記ゲインスロープ補償光フィルタが、プローブ法によるゲインスロープ ($dG/d\lambda$) 評価法を用いて設計されたことを特徴とする光モジュールである。

本発明の光増幅モジュールの第 1 の実施態様は、前記光モジュールと、光増幅器と、が光学的に接続されたことを特徴とする光増幅モジュールである。

本発明の光増幅モジュールの他の実施態様は、前記光増幅器が希土類添加ファイバ増幅器であることを特徴とする光増幅モジュールである。

本発明の光増幅モジュールの他の実施態様は、信号光の搬送方向に対して、入側の光増幅器と、出側の光増幅器と、1 基の前記光モジュールと、が備えられ、前記光モジュールが前記入側の光増幅器と前記出側の光増幅器の間に配置されたことを特徴とする光増幅モジュールである。

本発明の光伝送システムの第 1 の実施形態は、前記光モジュールと、光増幅器と、光分岐手段と、が備えられ、周波数多重 (Frequency Division Multiplexing: FDM) した信号光を分岐して伝送することを特徴とする光伝送システムである。

本発明の光伝送システムの他の実施形態は、前記光モジュールと、光増幅器と、光分岐手段と、が備えられ、周波数多重 (Frequency Division Multiplexing: FDM) した信号光を、更に波長多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) して分岐、伝送することを特徴とする光伝送システムである。

本発明の光伝送システムの第 1 の実施形態は、前記光増幅器が希土類添加ファイバ増幅器であることを特徴とする光伝送システムである。

本発明の光増幅方法の第 1 の実施形態は、周波数変調された光信号を増幅する光増幅方法であって、光増幅手段と、光増幅される前あるいは後に光増幅利得のゲインスロープを平坦にするゲインスロープ補償手段を用いることを特徴とする光増幅方法である。

本発明の光増幅方法の他の実施形態は、前記ゲインスロープ補償手段に誘電体多層膜フィルタを用いることを特徴とする光増幅方法である。

図面の簡単な説明 (BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS)

図 1 (FIG. 1) は、本発明のゲインスロープ平坦化モジュールの実施形態の機器構成を示す概要図である。

図 2 (FIG. 2) は、プローブ法評価系の構成機器を示す図である。

図 3 (a) (FIG. 3A) は、本発明のゲインスロープ平坦化モジュールを用いた光増幅モジュールの実施形態の機器構成を示す概要図である。

図 3 (b) (FIG. 3B) は、図 3 (a) に示される光増幅モジュールのゲインスロープ波長特性を示す図である。

図 4 (a) (FIG. 4A) は、従来の光増幅装置の機器構成を示す概要図である。

図 4 (b) (FIG. 4B) は、図 4 (a) に示される光増幅装置のゲインスロープ波長特性を示す図である。

図 5 (FIG. 5) は、プローブ法で算出したゲインスロープ逆特性 (Loss slope) を示す図である。

図 6 は、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) のロスプロファイル (Loss profile) の一例を示す図である。

図 7 (FIG. 7) は、本発明のゲインスロープ補償モジュール、光増幅モジュールを適用した、3 段増幅を行なう光通信システムの実施例 2 の機器構成を示す概要図である。

図 8 (FIG. 8) は、本発明の光増幅モジュールを適用した、3 段増幅を行なう光通信システムの実施例 1 の機器構成を示す概要図である。

図 9 (FIG. 9) は、従来技術であるアルミニウム (Al) を高濃度に添加したエルビウムドープ光ファイバ (EDF) を使用したエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) のゲインスロープの波長特性を示す図である。

発明の好ましい態様

(DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS)

以下に発明の好ましい態様を、図面を使いながら詳細に説明する。

(ゲインスロープ補償モジュール)

まず、本発明のゲインスロープ補償モジュールの実施形態を、図 1 を

参照しながら詳細に説明する。このゲインスロープ補償モジュール1は、ゲインスロープ補償光フィルタ4 (Gain Slope Compensation Filter: GSCF) に、入側の光ファイバ2と出側の光ファイバ3が、光学的に接続された光モジュールである。

更に詳細に説明すると、ケース7の中に、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4と、入側コリメータ5と、出側コリメータ6とが設置されており、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4は、入側コリメータ5と出側コリメータ6の間に配置されている。入側コリメータ5は、コリメータレンズ5aとフェルール5b、レンズホルダ5cで構成される。入側のファイバ2は、フェルール5bに固定され、更にフェルール5bは、ファイバ端から出射された光がコリメータレンズ5aによってコリメートされるよう、レンズホルダ5cを用いてレンズ5aに固定される。

また、出側コリメータ6も同様にコリメータレンズ6aとフェルール6b、レンズホルダ6cで構成され、出側のファイバ3は、フェルール6bに固定されており、更にフェルール6bは、コリメータ5を通過したコリメート光がコリメータレンズ6aによってファイバ3の端面に入射するよう、レンズホルダ6cを用いてレンズ6aに固定される。

入側コリメータ5、出側コリメータ6の構成については、入側のファイバ2とコリメータレンズ5a、および出側のファイバ3とコリメータレンズ6aのそれぞれを光学的に結合させるものであれば、本実施形態で示したものに限られない。例えば、フェルール5bとコリメータレンズ5a (フェルール6bとコリメータレンズ6a) を直接固定してもよいし、レンズホルダ5c、6cを更に複数の部品に分割してより細かい調整固定が可能な構成にしてもよい。

光増幅器の入力側、又は、出力側にこのゲインスロープ補償モジュール1を接続すると、この光増幅器の出力光のゲインスロープ ($dG/d\lambda$) を平坦化して、アナログアンプの動作領域 (適用領域) を拡大する事が可能である。

例えば、光増幅器の出力側にこのゲインスロープ補償モジュール1が接続された場合には、光増幅器からの出力光が、入側の光ファイバ2中を伝送され、入側コリメータ5からゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4へ入射される。ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4を通過した信号光は、出側コリメータ6から出側光ファイバへ伝送され、出側光ファイバ中を更に伝送される。この出側光ファイバから出力される光信号においては、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4によつ

て、光増幅器を使用する広い波長帯域においてゲインスロープ ($dG/d\lambda$) が平坦化されている。その結果、式 (1) で示されるように CSO が抑制され、広い波長帯域において信号歪の少ない光増幅器が得られる。

このゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4 としては、チャープの少ない光学特性を有するフィルタを用いる必要がある。従って、具体的には、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) 4 として、誘電体多層膜フィルタを適用することが考えられる。

また、誘電体多層膜フィルタの代わりに、長周期ファイバグレーティングを用いることも可能である。ファイバグレーティングは、通常、光ファイバに紫外線ビームを照射して、光ファイバの屈折率を変化させて、形成するが、この形成するグレーティングのピッチが、 $100\mu\text{m}$ から $1000\mu\text{m}$ 程度のものを、長周期ファイバグレーティングと称している。長周期ファイバグレーティングは反射率の波長依存性が比較的緩やかであるためにゲインスロープ ($dG/d\lambda$) にリップルが発生しにくく、短周期のものにくらべ平坦なゲインスロープ ($dG/d\lambda$) を得ることができる。また、ファイバグレーティングによる GSCF は光ファイバ上に形成されるために、コリメータ 5 やコリメータ 6 が不要であり、簡便な構造にすることができる。

いずれのフィルタを用いる場合においても、光増幅器の使用波長帯域において、ゲインスロープ ($dG/d\lambda$) の平坦化が可能になるような光フィルタを設計することが、最も重要な技術項目である。

(ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) の設計方法)

次に、このゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) の設計方法の実施形態について詳細に説明する。この実施形態では、光増幅器としてエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) を使用する場合について説明する。

(1) ゲインスロープの測定

チャープを持つ信号光をエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) に入力する場合、エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) の応答速度が ms 程度であるため、エルビウムドープ光ファイバ (EDF) の反転分布はチャープの影響は受けず信号光の平均波長により決まる。一方、信号光は、チャープによる波長の広がりによる利得波長依存性 (ゲインスロープ) の影響を受ける。したがって、このことを利用し、図 2 に示すような評価系を用いることにより、ゲインスロープ ($dG/d\lambda$) を測定す

ることができる

> ゲインスローブ評価法（プローブ法）

アナログ信号を伝送する為の信号と等しい波長の信号を Locked Inversion Signal とする。これに対し、増幅器の増幅特性に影響を及ぼさない程度の低い信号光パワーを Probe Signal とする。Locked Inversion Signal と Probe Signal とのパワーレベルの差は、Probe Signal が Locked Inversion Signal に対し、およそ 20dB 以上差があることが望ましい。

これら 2 つの信号をスターカップラ（Star Coupler）で合波し、増幅器の入力信号として用いる。

Locked Inversion Signal は実際にキャリア信号を周波数多重（FDM）した信号を載せる信号であるから、こちらは所定の波長に設定する。

Probe Signal はその近傍の LI（Locked Inversion）Gain を評価する信号の為、Locked Inversion Signal を中心に±数 nm の間隔でスイープするものとする。

先に説明した Locked Inversion Signal と Probe Signal の合波された入力信号をエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）に入力する。この Probe Signal をスイープさせ、Locked Inversion Signal を入力したことによって形成された反転分布状態で生ずる波長依存 LI Gain を、Probe Signal から式（2）を用いて求める。

$$LI\ Gain(\lambda) = \frac{P_{out, prb}(\lambda) - P_{ase, prb}(\lambda)}{P_{in, prb}(\lambda)} \quad [dB]$$

式（2）

ここで、

LI Gain(λ)：各波長における LI Gain (dB)

P_{in, prb}(λ)：各波長における入力 Probe 信号パワー (dB)

P_{out, prb}(λ)：各波長における出力 Probe 信号パワー (dB)

P_{ase, prb}(λ)：各波長におけるプローブ光の ASE (Amplified Spontaneous Emission) パワー (dB)

である。

(2) ゲインスローブ逆特性の算出

次に、所定の波長を中心とした波長依存 LI Gain(λ)を2次関数近似し、1次微分して求めた入力信号波長のゲインスロープ(単位: dB/nm)の逆特性を算出する。このゲインスロープ算出を各波長に対して実施し、図5の例に示すようなゲインスロープ($dG/d\lambda$)の逆特性であるロススロープ(Loss slope)を得る。

ここで、グラフの縦軸はロススロープ(dB/nm)を示し、横軸は波長(nm)を示す。このロススロープ(Loss slope)はエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)のゲインスロープ($dG/d\lambda$)を補償するものなので、この結果を反映させたゲインスロープ補償光フィルタ(GSCF)のプロファイルを決定する。

参考として、図6に、ゲインスロープ補償光フィルタ(GSCF)のロスプロファイル(Loss Profile)の一例を示す。ここで、グラフの縦軸はロスプロファイル(dB)を示し、横軸は波長(nm)を示す。

なお、このプローブ法は、ゲインスロープ($dG/d\lambda$)の評価方法として最も一般的であり、且つ、正確な値の得られる最も優れた方法であるが、他の方法を用いることも可能である。

なお、ゲインスロープ逆特性の算出は、本発明においては二次関数近似の一次微分によって求めたが、任意のゲインスロープ($dG/d\lambda$)を精度良く近似できる他の関数等を用いても良い。

本発明では、2次歪(CS0)を誘起するゲインスロープ($dG/d\lambda$)の波長特性を解析して、それを補償するゲインスロープ($dG/d\lambda$)の逆特性を有する光学フィルタを設計し、この光学フィルタを用いることによって、より広範な波長帯域において信号歪が抑制されたエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)を得ることができる。従って、上記を満足するのであれば、上述の方法や関数等以外の任意の手法をとることも可能である。

(本発明の光増幅モジュール)

次に、光増幅器としてエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)を用い、このエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)に、上述の方法によって設計された本発明のゲインスロープ補償モジュールを接続させた光増幅モジュールの説明を行なう。

この光増幅モジュールによって、エルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)のゲインスロープ($dG/d\lambda$)を小さく抑える事が可能である。

従って、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) を適用することにより、アナログアンプの動作領域 (適用領域) を拡大する事が可能である。

この光増幅モジュールでは、1 又は 2 以上の所望の数の光増幅器と、1 又は 2 以上の所望の数のゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) を組み合わせることが可能である。光増幅器としては、前方励起、後方励起、双方向励起の場合が考えられるが、全ての場合に本発明のゲインスロープ補償モジュールを接続することができる。

ここで、代表的な光増幅モジュールの構成として、2 基の光増幅器を用いた 2 段増幅の光増幅モジュールの場合を考える。

2 段増幅の光増幅モジュールの 1 つの実施形態の機器構成を図 3 (a) に示し、その時のゲインスロープ ($dG/d\lambda$) の波長特性を図 3 (b) にそれぞれ示す。この実施形態では、ゲインスロープ補償モジュール (GSCM) を、最も効果的に活用できる位置である光増幅の段間、つまり 1 段目の光増幅器 (1st stage) と 2 段目の光増幅器 (2nd stage) の間に設けた場合を示している。

もちろん、ゲインスロープ補償モジュール (GSCM) を、光増幅モジュールの入力端 (1 段目の光増幅器 (1st stage) の入力側)、若しくは光増幅モジュールの出力端 (2 段目の光増幅器 (2nd stage) の出力側) に設けることも可能であり、ゲインスロープの平坦化に対する効果も得られる。

しかし、2 段階の光増幅モジュールにおいて、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) の損失を L 、1 段目の光増幅器 (1st stage) の雑音指数 (Noise Figure) を NF_1 、2 段目の光増幅器 (2nd stage) の雑音指数を NF_2 、第 1 段目の光増幅器 (1st stage) の利得を G_1 とすると、光増幅モジュールにおける全体の雑音指数 NF_{total} は下式のようにになる。

(1) 光増幅モジュールの入力端に設置した場合

$$NF_{total} = L + NF_1 + NF_2 / G_1$$

(2) 1 段目の光増幅器 (1st stage) と 2 段目の光増幅器 (2nd stage) の間に設置した場合 (図 3 (a) の場合)

$$NF_{total} = NF_1 + NF_2 / (G_1 - L)$$

ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) が 1 段目の光増幅器 (1st stage) の入力側に設置された場合には、損失 L が雑音として発生するが、

出力側に設置された場合には、雑音 L は発生しない。

従って、1 段目の光増幅器(1st stage)と 2 段目の光増幅器(2nd stage)の間に設置した(2)の場合には、入力端に設置した(1)の場合に較べて、雑音指数 NF_{total} が大幅に低減されることになる。例えば GSCF の損失 L を 3 dB、光増幅器の利得 G_1 を 20 dB とすると、(1)の場合の右辺第三項および(2)の場合の右辺第二項は共に G_1 が非常に大きいため無視され、その結果(1)と(2)の NF_{total} の差は(1)の場合の右辺第一項、 L 程度の大きさすなわち 3 dB 程度となる。ただし、(2)の場合は、(1)の場合に較べて、損失 L の分だけ増幅の効率は低下するが、2 段目の光増幅器(2nd stage)で調整することが可能である。

(3) 光増幅モジュールの出力端に設置した場合には、雑音 L は発生しないが、ゲインスロープ補償光フィルタ(GSCF)の損失 L が、最終的な増幅に直接効くので、光増幅モジュールの出力効率を低下させることになる。

従って、上述の光増幅モジュールにおける全体的な雑音指数と出力効率を総合的に判断すると、1 段目の光増幅器(1st stage)と 2 段目の光増幅器(2nd stage)の間に設置した(2)の場合が最も効果的に活用できることがわかる。

ただし、用途によっては、(1)や(3)の配置を適用した方が適した場合も考えられ、本発明の光増幅モジュールでは、あらゆる場合に最適の配置を行なうことができる。

次に、ゲインスロープ補償光フィルタ(GSCF)を適用しない従来の光増幅装置と比較しながら、図 3(a)に示された本発明の光増幅モジュールのゲインスロープ波長特性について説明する。

まず、従来技術であるゲインスロープ補償光フィルタ(GSCF)を適用しない場合の光増幅装置の構成例を図 4(a)に示し、その時のゲインスロープの波長特性を図 4(b)にそれぞれ示す。

上述と同様に、2 段増幅の光通信システムを考えると、ひとつの増幅器のゲインスロープの適用可能範囲は、0.3dB/nm である。

ここで本発明のゲインスロープ波長特性と、従来型のゲインスロープ波長特性を比較する。

図 4(b)に示すように、従来の構成では、使用可能波長帯域は、せいぜい 5nm 程度であるが、本発明の構成では、図 3(b)に示すように、

20nmとおおよそ4倍の波長帯域で良好な動作が確保できることが確認できる。従って、本発明の光増幅モジュールによって、使用波長帯域が大幅に増加する効果があることが証明された。

また、上述の実施形態においては、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）を利用した光モジュールを取り上げているが、増幅媒体はEDFだけに限定されなく、その他の希土類添加光ファイバが適用でき、また、増幅帯域も C-band に限定しない。例えば、増幅媒体としては、ホストガラスに Tellurite 系、Fluoride 系、Silica 系などを用いた物、ドーパントとしてはエルビウム、ツリウム、プラセオジウム、イットリビウム、テルビウム、ネオジウムなどを用いた物等、EDFA と同様の励起構成で信号光を増幅する光増幅器であれば適用可能である。更に、半導体増幅器等など、あらゆる種類の光増幅器の適用が可能である。

（本発明のゲインスロープ補償モジュール、光増幅モジュールを備えた光伝送システム）

（実施例 1）

図 8 に、本発明のゲインスロープ補償モジュールを適用した光伝送システムの 1 つの実施例の構成図を示す。この光通信システムは、単チャンネルの周波数多重（FDM）伝送システムであり、光カップラ等の光分岐手段を用いて、信号光を分岐、伝送するシステムである。各光増幅器（EDFA1～EDFA3）によって、分岐による損失を補償している。各光増幅器（EDFA1～EDFA3）のいずれか又は全ての内部に、図 1 に示される本発明のゲインスロープ補償モジュールが設置されている。

また、本実施形態では増幅器 3 段のタンデム接続の例を示したが、これは一例に過ぎず、光増幅器のゲインスロープ（ $dG/d\lambda$ ）の合計が、システム要求値以内であれば、光増幅器の段数は、1～n（n は整数）のいずれでもよい。

（実施例 2）

本発明のゲインスロープ補償モジュールを、各光増幅器ごとに必ず設置しなければ効果が得られないという訳ではない。ここで図 7 は、送信器から発信されたアナログ信号光を、光カップラ等の分岐手段を用いて分岐して伝送し、複数の受信器へ配信する光伝送システムである。この分

岐時の損失を光増幅器で補償しており、この光増幅器としてはエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）が用いられている。例えば、CATVを一般需要者へ配信するとき等に適用されている。

図7に示された光伝送システムでは、個々の光増幅器にはゲインスロープ補償モジュールを設けず、図7に示されるように、複数のエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）を伝送してきた信号光に対し、送信器から受信器の間の任意な場所にゲインスロープ補償モジュールを設置することによりゲインスロープ（ $dG/d\lambda$ ）を補償することもできる。

この実施例は、本発明のゲインスロープ補償モジュールを備えた光伝送システムと称することもできるし、また、複数のエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）とゲインスロープ補償モジュールが組み合わされた大きな光増幅モジュールとしてとらえることもできる。

本実施例においては、これらの複数のエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）とのゲインスロープ特性がほぼ同一になるか、もしくはゲインスロープ特性が予想されうるもの場合には、これらの重ね合わせによって、ゲインスロープ補償光フィルタ（GSCF）の逆特性を得ることができる。

また、ゲインスロープ特性がそれぞれが異なる場合においては、これらの複数のエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）のゲインスロープ特性を先に示したプローブ法などの方法により測定した上で、ゲインスロープ補償光フィルタ（GSCF）のゲインスロープ逆特性を解析し設計することができる。

ゲインスロープ補償モジュールは、図7に示される位置の他に、様々な配置が考えられる。例えば、ゲインスロープ補償モジュールを送信器側に設置して、累積するゲインスロープ（ $dG/d\lambda$ ）を予め平坦化するという方法も考えられる。一方、ゲインスロープ補償モジュールを個々の受信器側に設置して、最終的にゲインスロープ（ $dG/d\lambda$ ）を平坦化する方法も考えられる。

以上のように、本発明においては、増幅器の内部に本発明のゲインスロープ補償モジュールを設けることも可能であるし、また、増幅器の段間に本発明のゲインスロープ補償モジュールを設けることも可能である。更に、その両方のタイプの光モジュールを併用して組み合わせること

も可能である。また、増幅器の段数は、増幅器のゲインスロープの合計が、システム要求値以内であれば、増幅器の段数は、 $1 \sim n$ (n は整数)のいずれでもよい。

また、光伝送システムの分岐手段としては、光カップラを用いる他、その他様々な分岐方法を適用することが可能である。例えば、メトロシステムに、光増幅器と本発明のゲインスロープ補償モジュールを組み合わせた光伝送システムも本発明の実施形態に含まれる。

このように、本発明によるゲインスロープ補償モジュールを用いることにより、エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) をはじめとする光増幅器を備えた光増幅モジュール、及び、この光増幅器やゲインスロープ補償モジュールを備えた光伝送システムにおいて、より広範な信号光波長帯域を利用することができる。

(その他の実施形態)

上述の実施形態では、単チャンネルの信号光伝送における周波数多重 (FDM) 伝送について、本発明のゲインスロープ補償モジュール、光増幅モジュールの適用を説明したが、周波数多重 (FDM) した信号光を、更に、波長多重 (WDM) して伝送する場合においても、本発明のゲインスロープ補償モジュール、光増幅モジュールを適用することが可能である。

単チャンネルの場合には、仮に光増幅器を使用する一定の波長帯域でゲインスロープ ($dG/d\lambda$) が平坦でなくとも、ゲインスロープ ($dG/d\lambda$) が水平になっているポイントの波長の信号光を使用すれば、出力の変動を抑えることができる。しかし、波長多重 (WDM) の場合には、例えば2つの異なる波長の信号光を増幅する場合を考えると、励起光は1つだけなので、互いに励起光のエネルギーを取り合うことになる。従って、一方の信号光が変動すると、もう一方の信号光も変動して、ゲインスロープ ($dG/d\lambda$) も変化することになる。従って、ゲインスロープ補償光フィルタ (GSCF) を有さない従来の光増幅装置では、周波数多重 (FDM) 信号光の波長多重 (WDM) 伝送システムにおける光増幅は、非常に困難である。

一方、本発明のゲインスロープ補償モジュール、光増幅モジュールを適用した場合には、光増幅器を使用する広い波長帯域において、ゲインスロープ ($dG/d\lambda$) は平坦であるので、上記の問題は発生せず、周波数多重 (FDM) 信号光の波長多重 (WDM) 伝送システムにおける光増

幅を実現することができる。